



不同工况下巨型沉井水流力及流场研究

韩鹏鹏^{1,2,3}, 冯先导^{1,2,3}

- (1. 中交第二航务工程局有限公司, 湖北 武汉 430040;
 2. 长大桥梁建设施工技术交通行业重点试验室, 湖北 武汉 430040;
 3. 交通运输行业交通基础设施智能制造技术研发中心, 湖北 武汉 430040)

摘要: 水流经过沉井时, 由于沉井对过水断面的压缩造成沉井周围流场的变化。为了探索不同流速、流向和水深工况下沉井受力变化, 在模型试验与 CFD 数值模拟的基础上, 采用控制变量法对沉井在着床、浮运过程中的流场变化规律进行研究; 针对规范公式对大型结构计算存在的不足, 提出对侧压缩系数进行修正。计算结果表明: 随着流速的增加, 水流力与流速呈抛物线分布; 随着水流流向角的增加, 沉井受到的纵向和横向水流力同时呈现增加的趋势; 在沉井逐渐抬升的过程中, 水流呈先增加后减小的趋势, 当沉井底部与河床相距超过 10m 后, 沉井所受水流力将不受水深影响而保持稳定。

关键词: 沉井; 水流力; 流场分析; 计算流体动力学

中图分类号: TV 13; U 6

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)09-0028-05

Study on flow force and flow field of giant caisson under different working conditions

HAN Peng-peng^{1,2,3}, FENG Xian-dao^{1,2,3}

(1.CCCC Second Harbor Engineering Co., Ltd., Wuhan 430040, China;

2.Key Laboratory of Large-span Bridge Construction Technology, Wuhan 430040, China; 3.Research and

Development Center of Transport Industry of Intelligent Manufacturing Technologies of Transport Infrastructure, Wuhan 430040, China)

Abstract: When water flows through the caisson, the caisson's compression across the water section will change the flow field around it. To explore the change of stress on the caisson under different velocities, flow, and caisson depths, we adopt the control variable method to study the flow field variation law in the process of caisson bedding and floatation based on the model experiment and CFD numerical simulation. In view of the shortcomings of the standard formula for large structure calculation, we propose the lateral compression coefficient for modification. The calculation results show that with the increase of the flow velocity, the flow force and flow velocity distribute in a parabolic curve; with the increase of the flow direction angle, the longitudinal flow force and transverse flow force of the caisson increase simultaneously; during the gradual uplift of the caisson, the flow increases at first and then decreases; when the distance between the bottom of the open caisson and the riverbed is more than 10 m, the flow force of the open caisson will remain stable regardless of the water depth.

Keywords: caisson; water flow; flow field analysis; computational fluid dynamics(CFD)

沉井以自身整体性强、稳定性好、能形成干地施工等诸多优点在工程上得到越来越多的应用。钢沉井在船坞建造完成后, 经拖船浮运至指定位置。在浮运过程中, 其受力过程是动态变化的, 受水流的流向、速度变化影响, 其浮运过程受力

更加复杂, 因此对沉井浮运过程中流场特征分析是工程建设所需解决的重要问题。魏立新^[1]通过数值模拟与模型试验对比分析, 在壁面黏滞力和逆压梯度情况下, 来流与壁面质壁出现分离现象, 在沉管尾部形成回流; 胡勇^[2]对施工期沉井在不

同工况下的水流力进行系统研究, 得出顺向和横向水流力的变化规律及计算方法; 王贵春^[3]通过对水流作用下圆柱体流场分析, 建立了一种分析圆柱体涡激振动的方式; 刘浪^[4]用有限体积法对高雷诺数下水流作用力进行模拟, 确定 C_D 值与截面形状的关联; Kawamura T.^[5]发现在 Fr 较大的情况下, 漩涡脱落有所衰减, 造成剪切层向外倾斜; Scarano F. 等^[6]利用 PIV 对层流和紊流中的漩涡脱落进行细致的研究; 张新润^[7]以模型试验为基础进行了涡摆动周期验证和时均流场分析, 且测量圆柱绕流后方流场的水平切面。综上所述, 前人学者利用数值模拟和模型试验对流固耦合进行分析并取得了丰富的研究成果, 但对于大型浮体结构水流运动揭示并不充分。本文以某沉井基础为例, 借助计算流体动力学(CFD)比对沉井浮运期间在不同流速、流向和水深情况下流场的变化, 从而相对准确地预测沉井在浮运期间水流阻力的变化, 以期为沉井浮运安全控制提供参考。

1 工程概况

沉井平面呈圆端形, 沉井底面尺寸 $95.0\text{ m} \times 57.8\text{ m}$ (横桥向 \times 纵桥向), 圆端半径 28.9 m , 高为 43.0 m 。沉井浮运时, 吃水深度为 8 m , 沉井结构见图 1。

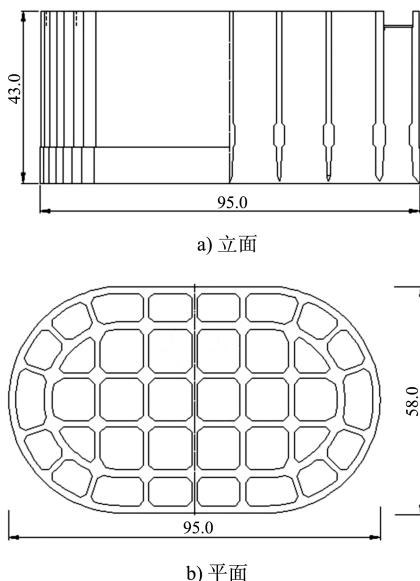


图 1 沉井浮体结构(单位: m)

2 沉井浮运流场与水流力分析

2.1 CFD 数值模型的建立

钢沉井周围流场是一种紊流充分发展的含有涡系结构的流场, 由于数值模拟采用壁函数理论, 要求壁面网格尺寸 y^+ 为 30 最好, 如果采用原型尺度进行数值模拟, 计算网格数量巨大, 需要耗费大量的计算机资源。此外, CFD 数值模拟与模型试验, 为了避免尺度效应带来的误差影响而采用与模型试验同等尺寸进行模拟, 即数值模拟采用重力相似准则, 几何相似比为 1:100; 相应流速比尺为 1:10; 力比尺为 $1:10^6$ 。湍流模型采用 SSTk-w^[8-9]结合 $k-e$ 与 $k-\omega$ 模型优势, 不仅考虑湍流剪切的作用, 而且能够很好地处理边界层和紊流区水流漩涡, 使得方程求解具有更高的精度和可信度, 模型计算区域在 X、Y、Z 方向上分别取 600、300、50 cm。模型入口边界采用速度边界, 入口水深为 8 cm; 模型出口边界采用压力边界, 出口水深为 8 cm, 两侧采用对称边界, 最小网格尺寸为 0.05 mm, 采用自适应步长, 初始步长为 0.001 s, 如图 2 所示。

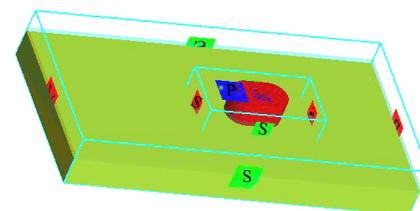


图 2 沉井 CFD 数值模模型

模拟时长为 600 s。水流力在 300 s 以后保持稳定(图 3)。

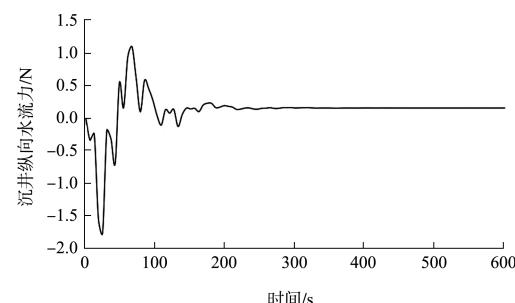


图 3 水流力随时间变化曲线

2.2 模型可靠性验证

结合以往水力模型试验^[10-12], 该水槽设计成单向流水槽, 总长 34 m, 净宽 4.8 m。按照重力相似

准则，上游采用矩形薄壁量水堰调控流量，下游采用横向推拉式尾门微调水位。试验采用 CSY-II 检测设备测试水流力，传感器的敏感度为 0.001 N，每次采样时间为 250 s，每组试验重复 3 次，以消除偶然误差，确保数据精准可靠。对不同流速情况下的模型试验与数值模结果进行对比分析，验证数值模拟沉井浮运过程中水流力的准确性(图 4)。



图 4 沉井浮体模型试验

在不同流速工况下，数值模拟计算结果总体上与模型试验结果较为吻合，水流阻力与流速呈二次分布(图 5)。从图 5 可知，在 0.2 m/s 工况下，水流力相差在 3% 以内，说明数值模拟采用的紊流模型、网格划分、边界条件等计算方法可以准确预测沉井浮体的受力状况；对于沉井浮体其他试验工况，可以通过数值模拟来获得沉井浮体在浮运过程中的流场和受力状况。

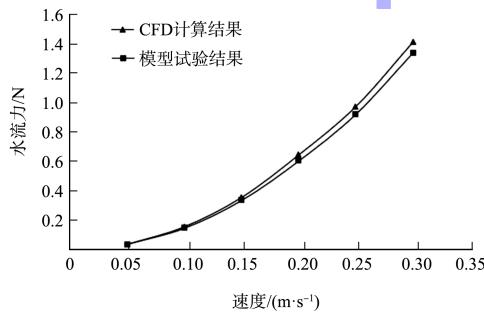


图 5 水流力数值与试验结果对比

2.3 计算工况

为了研究巨型沉井在不同流速、流向和水深下的水力变化，数值模拟共进行了 23 组工况组合，主要包括在流向角为 0°，沉井距河床面为 0 m，原型流速 0.5、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0 m/s 等 6 组工况下沉井纵向受力随流速的变化；在流速为 2.0 m/s，沉井距河床面为 0 m，原型流向角度为

0°、5°、10°、15°、20°、25°、30°、35°、40°、45° 等 10 组工况下沉井横向和纵向受力随流向角变化；在流速为 2.0 m/s，流向角为 0°，原型沉井底部距离河床面为 0、2、4、6、8、10、15 m 等 7 组工况下沉井纵向受力随水深变化。

2.4 不同流速工况流场特征分析

对于沉井浮体布置相同而仅速度不同的工况，流场分布极其相似。以 0.2 m/s 流场分布作为参考进行分析，由于沉井浮体阻水效应，在沉井浮体正前方流速相对较小，在压力梯度作用下，在沉井的两侧流速陡然上升，受沉井壁面黏滞影响和逆压梯度作用，水流经过沉井后在壁面产生质壁分离现象，在沉井的尾部形成回流区。漩涡脱落引起的横向力较小为 10 kN，远小于纵向水流力，暂不做考虑(图 6)。

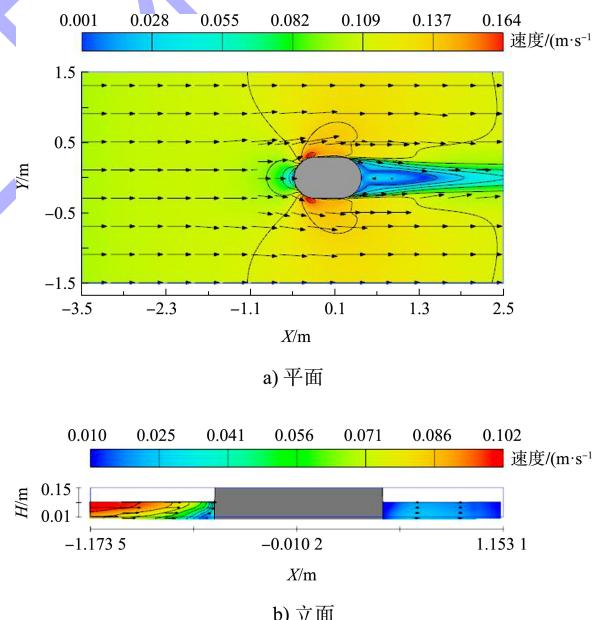


图 6 0.1 m/s 沉井流场矢量分布

对于直径较小的浮体结构，其水流横向力可以忽略不计；但对于大型沉井浮体结构，其横向力会造成沉井浮体在浮运过程中摆动，因此应加以重视，目前尚无规范对其进行论述，可以通过数值模拟和模型试验求得。从图 7 可以看出，在流向 45° 的工况下，流体经过沉井浮体时，在沉井圆角前端流速降低，沿着沉井侧壁流速逐渐增加，在沉井的尾部圆角处流速达到最大，由于水流与沉井浮体存在一定的夹角，两侧面的流速不同，

根据伯努利方程, 压强也不同, 其产生的压力差会造成经过浮体的水流横向摆动, 在沉井浮体的背流面由于沉井浮体的遮蔽效应, 形成漩涡低压区, 此处的流体扰动更加复杂。随着流向角的增加, 水流与浮体之间的相互作用更加强烈, 由于在流向垂直面上的投影逐渐增加, 因此受到的合力也在增加, 如图 8 所示。

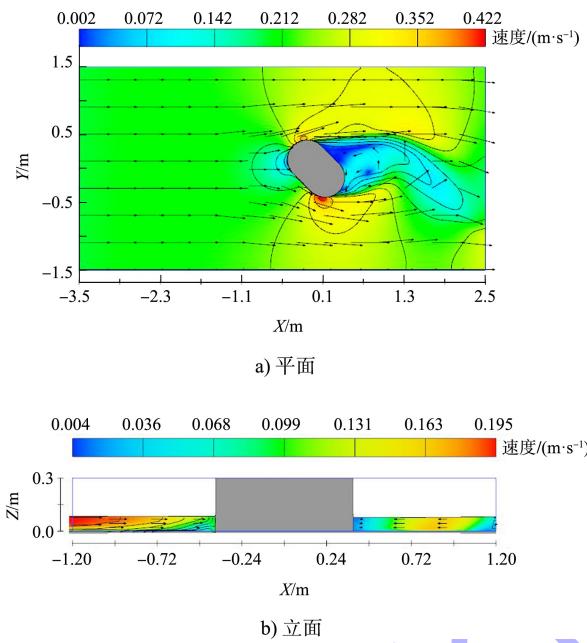


图 7 流向角为 45° 沉井流场矢量分布

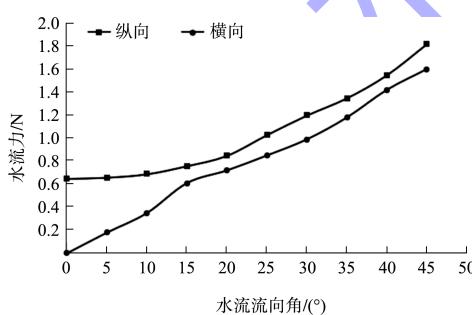


图 8 沉井水流力随流向角变化曲线

随着钢沉井底部河床面距离增加, 由于钢沉井的阻水效应, 沉井两侧流速有增加趋势, 相对于着床后的沉井流场, 水流可经过沉井底部流向下游, 速度增加梯度分布有所减弱, 因此沉井的尾部受涡流影响有所降低, 在钢沉井与河床面之间距离较小时, 在其间形成高速水流, 沿沉井底部纵向逐渐降低, 直至与尾部回旋流碰撞, 最终流向下游(图 9)。

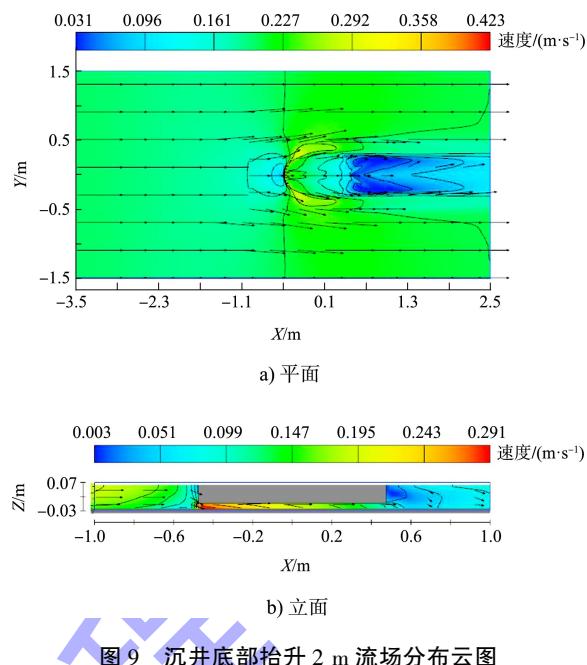


图 9 沉井底部抬升 2 m 流场分布云图

钢沉井受到的水流力分为壁面剪切力和壁面压力两部分, 在沉井抬升的过程中, 沉井底部受到高速水流的剪切作用, 沉井受到的水流合力会陡然升高。随着抬升高度的增加, 沉井阻水效应减弱, 因此对流速影响逐渐减小。当高度超过河床面 10 m 以上时, 水深对水流力的影响可以忽略。因沉井底部还受到水流的剪切作用, 在相同的流速下, 沉井的浮运状态受到的水流力比着床以后受到的水流力大(图 10)。

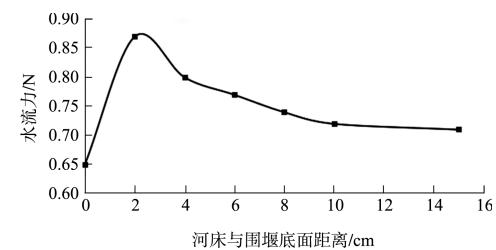


图 10 水流力随沉井抬升变化曲线

3 大型浮体水流力及其修正计算

根据港口工程荷载规范^[13], 水流力 F_w 计算公式为:

$$F_w = 0.5 C_w \rho v^2 A \quad (1)$$

式中: C_w 为水流阻力系数, 圆端沉井取值 0.52; ρ 为水的密度; v 为水流设计流速; A 为沉井在流向垂直平面上的投影面积。

CFD 计算得到的水流力满足二次抛物线特性,

与规范公式计算结果分布较为相似：在流速较小的工况下，针对大型浮体水流力的计算偏差较小；但在中高流速工况下，根据数值模拟与模型试验结果(图 11)，存在不可磨损的误差，因此针对大型浮体结构须对规范公式进行修正。由于大型浮体沉井对过水断面进行压缩而形成绕流，从而造成局部压力成倍增加，因此水流力随之上升。因水流力在沉井浮运拖轮配置时起到决定性作用，其合理评估对于方案的实施至关重要，因此有必要对规范公式进行修正：应增加侧收缩系数 B_η ，基于本次数值模拟和模型试验结果， B_η 取值为 1.25。

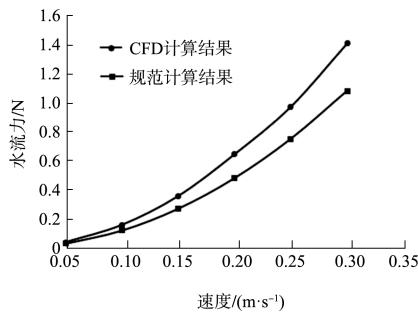


图 11 沉井体型最大冲刷深度对比计算

即水流力的计算公式为：

$$F_w = 0.5 C_w B_\eta \rho v^2 A \quad (2)$$

在 0.2 m/s 工况下，沉井水流力模型计算结果为 0.61 N，规范公式通过修正计算 0.61 N，其他工况的流速规范公式计算值较模型试验偏差在 5% 以内。可见，修正后计算值与模型试验值比较吻合，因此采用增加测收缩小数对规范公式的修正具有合理性。

4 结论

1) 根据物理模型试验和数值模拟结果，沉井浮体在不同流速下水流阻力计算结果吻合良好，证明数值模拟计算水流力具有良好的可靠性。

2) 随着流速的增加，沉井浮体结构受到的水流阻力相应增加，呈二次分布。水流流向角的增加使沉井浮体结构周围流程更加复杂，受到的水流合力随之增加，且在流向角小于 15° 时，横向力增加的速率较纵向力增加速率大。

3) 随着沉井底部距离河床面高度的上升，沉井浮体浸润面积增加，水流剪切力增加，钢沉井

脱离床面时，受到高速水流剪切的作用，水流力呈先上升后下降的趋势。

4) 根据数值模拟和规范公式的计算结果，规范公式对于大型浮体的水流力的计算存在一定的局限性，由于大型浮体对水流压缩效应，建议增加一个侧收缩系数 $B_\eta = 1.25$ ，可以提高规范公式水流力计算的适用性，为沉井浮运方案编制提供科学依据。

参考文献：

- [1] 魏立新, 杨春山, 莫海鸿, 等. 沉管隧道变截面管段浮运流场及水流力分析[J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(S2): 607-612.
- [2] 胡勇, 杨进先. 施工期桥梁沉井水流力研究[J]. 桥梁建设, 2010(5): 12-15.
- [3] 王贵春. 水流作用下圆柱体的涡激振动分析[J]. 科学技术与工程, 2007(1): 22-25.
- [4] 刘浪. 跨海桥梁下部结构波流力计算方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
- [5] KAWAMURA T, MAYER S, GARAPON A, et al. Large eddy simulation of a flow past a free surface piercing circular cylinder[J]. Journal of fluids engineering, 2002, 124(1): 91-101.
- [6] SCARANO F, POELMA C. Three-dimensional vorticity patterns of cylinder wakes[J]. Experiments in fluids, 2009, 47(1): 69-83.
- [7] 张新润, 孙昭晨, 梁书秀. 圆柱型桥墩绕流的流场特性实验分析[J]. 科技创新导报, 2012(24): 133.
- [8] WU J S, HSIEH M. An experimental method for added mass motions[J]. Ocean engineering, 2001, 28(4): 417-438.
- [9] BURROWS R, TICKELL R G, HAMES D, et al. Morison wave force coefficients for application to random seas[J]. Applied ocean research, 1997, 19(3): 183-199.
- [10] 周华兴, 孙玉萍. 墩柱受水流作用时阻力系数的试验研究[J]. 港工技术, 1986(1): 14-19, 39.
- [11] 北京交通大学. 沉管隧道拖拽模型试验及原型计算报告[R]. 北京: 北京交通大学, 2012.
- [12] 上海交通大学国家重点实验室. 管节浮运沉放结构受力受力数学模型分析研究报告[R]. 上海: 上海交通大学国家重点实验室, 2012.
- [13] 中交第一航务工程勘察设计院. 港口工程荷载规范: JTS 144-1—2010[S]. 北京: 人民交通出版社, 2010.